

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES E LOGÍSTICA

VIRGÍNIA DE ALMEIDA SANTOS

PROPOSTA DE VIAS PARA O TRANSPORTE DE PRODUTOS PERIGOSOS EM
JOINVILLE-SC

Joinville
2017

VIRGÍNIA DE ALMEIDA SANTOS

PROPOSTA DE VIAS PARA O TRANSPORTE DE PRODUTOS PERIGOSOS EM
JOINVILLE-SC

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia de Transportes e
Logística pela Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Cassiano Augusto
Isler

Joinville
2017

RESUMO

O transporte de produtos perigosos é aquele que desloca substâncias que podem representar algum tipo risco quando são acondicionados de forma inadequada, trafegam em áreas críticas, e/ou são conduzidas de forma inadequada, tornando-se portanto relevantes para a manutenção da segurança e saúde pública possivelmente exposta. O risco é um parâmetro que está relacionado à probabilidade de ocorrer acidente em adição à consequência. Assim, estimar o risco no transporte de produtos perigosos no meio urbano significa considerar o fluxo existente em paralelo às condições do local em que se dá esse transporte. Existem variáveis que podem ser consideradas na formulação matemática do risco, entre elas a taxa de acidentes ou até aspectos geométricos das vias. O objetivo deste trabalho é propor um conjunto de vias exclusivas para o transporte de produtos perigosos no município de Joinville, Santa Catarina, considerando os dados existentes, uma vez que não existe atualmente uma medida que proponha essa restrição. Um método para mensuração do risco do transporte de produtos perigosos foi utilizado para estimar o número de habitantes potencialmente expostos sob a hipótese de acidentes envolvendo veículos que transportam produtos perigosos nas vias do município. Pela aplicação de um algoritmo de caminho mínimo foram obtidos resultados sobre o número total de habitantes expostos considerando diferentes cenários de acesso à cidade e, entre esses cenários, aquele que provê menor risco à população, o qual pode contribuir para o processo de tomada de decisão pelo setor público.

Palavras-chave: Produtos Perigosos. Rotas. Caminho Mínimo.

ABSTRACT

The dangerous goods transportation is one that displaces substances that may represent some kind of risk when they are improperly packed, travel in critical areas, and / or are conducted inappropriately, and are therefore relevant to the maintenance of safety and public health possibly exposed. Risk is a parameter that is related to the probability of an accident occurring in addition to the consequence. Thus, estimating the risk in the transport of hazardous products in the urban environment means considering the existing flow in parallel with the conditions of the place where the transportation takes place. There are conditions that may be considered in the mathematical formulation of the risk, being they the rate of accidents or even geometric aspects of the roads. The present work consists of proposing a set of exclusive routes for the transportation of hazardous products in the city of Joinville, Santa Catarina, considering the existing data for the study, since there is currently no measure that proposes this restriction. A method for measuring the risk of transporting dangerous products was used to estimate the number of potentially exposed inhabitants under the hypothesis of accidents involving vehicles transporting dangerous products on the roads of the municipality. By applying a shortest path algorithm, results were obtained on the total number of inhabitants exposed considering different scenarios of access to the city and, among those scenarios, one that provides a lower risk to the population, which can contribute to the decision making process by the public sector.

Keywords: Dangerous goods. Routes. Shortest path.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de rótulo e painel de segurança.	12
Figura 2 – Classificação de Produtos Perigosos segundo GHS.	13
Figura 3 – Classificação de Produtos Perigosos segundo o sistema <i>GHS</i>	14
Figura 4 – Rotas destinadas ao Transporte de Produtos Perigosos no Brasil. .	15
Figura 5 – Exemplo de grafo ponderado.	19
Figura 6 – Algoritmo de Dijkstra.	21
Figura 7 – Sequência metodológica do problema abordado.	22
Figura 8 – Rede viária, hidrografia e áreas de fragilidade ambiental de Joinville.	23
Figura 9 – Registro de acidentes com vítimas na cidade de Joinville (2015). . .	25
Figura 10 – Mapa de vias de Joinville com 10 ou mais acidentes em 2015. . . .	26
Figura 11 – Largura da zona de impacto.	30
Figura 12 – Rede de transporte de Joinville com pontos de origem e destino. . .	32
Figura 13 – Magnitude dos parâmetros para cálculo de risco nas vias da rede de tráfego de Joinville.	33
Figura 14 – Rede de transporte de Joinville.	34
Figura 15 – Cenário com permissão de entrada pelos acessos Norte, Centro e Sul.	35
Figura 16 – Cenário com permissão de entrada pelos acessos Centro e Sul. . .	36
Figura 17 – Cenário com permissão de entrada pelos acessos Norte e Centro. .	37
Figura 18 – Cenário com permissão de entrada pelos acessos Norte e Sul. . . .	39
Figura 19 – Cenário com permissão de entrada pelo acesso Centro.	40
Figura 20 – Cenário com permissão de entrada pelo acesso Sul.	41
Figura 21 – Cenário com permissão de entrada pelo acesso Norte.	42
Figura 22 – Comparação entre cenários.	43
Figura 23 – Sinalização vertical e horizontal de produtos perigosos.	44
Figura 24 – Sinalização vertical para o transporte de carga.	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	Objetivo Geral	9
1.2	Objetivos Específicos	9
1.3	Estrutura do trabalho	9
1.4	Justificativa	10
2	REVISÃO TEÓRICA	11
2.1	Transporte de Produtos Perigosos	11
2.2	Legislação	13
2.2.1	Internacional	13
2.2.2	Nacional	14
2.2.3	Estadual	15
2.2.4	Municipal	15
2.3	Modelagem Matemática	16
2.3.1	Modelagem de risco	16
2.3.2	Redes de Transporte	18
2.3.3	Caminho mínimo	19
2.3.4	Algoritmo de Dijkstra	20
3	MÉTODO	22
3.1	Aquisição e Análise dos Dados	23
3.2	Modelo Proposto	24
3.2.1	Número de acidentes total	25
3.2.2	Probabilidade de ocorrer acidente com caminhão	25
3.2.3	Probabilidade de ocorrer acidente na via	28
3.2.4	Probabilidade de ocorrer acidente na via com caminhão	29
3.2.5	Comprimento do segmento	29
3.2.6	Densidade Populacional	29
3.2.7	Largura da zona de impacto	30
3.2.8	Risco Populacional	30
3.3	Origens e destinos da rede de tráfego	31
4	RESULTADOS	34
4.1	Cenário 1: Acessos Norte, Centro e Sul	35
4.2	Cenário 2: Acessos Centro e Sul	36
4.3	Cenário 3: Acessos Norte e Centro	37
4.4	Cenário 4: Acessos Norte e Sul	38

4.5	Cenário 5: Acesso Centro	39
4.6	Cenário 6: Acesso Sul	40
4.7	Cenário 7: Acesso Norte	41
4.8	Comparação entre cenários	42
4.9	Sugestões de aplicação	44
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
	Referências	47

1 INTRODUÇÃO

Produto perigoso é todo material que representa algum tipo de ameaça à segurança pública, ao meio ambiente ou à saúde da população, seja de origem natural ou obtido por algum processo artificial (AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES, 2012). A identificação para o transporte, manuseio, movimentação e armazenamento desses produtos é padronizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) segundo a NBR 7500 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

Com o desenvolvimento da indústria química e o crescimento da produção e do consumo de produtos perigosos, o transporte desses materiais vem se tornando foco de interesse tanto por parte do setor privado quanto dos órgãos reguladores, este último responsável por medidas em prol da segurança (SANTA CATARINA, 2013).

Historicamente, foi somente após a Segunda Guerra Mundial que o transporte desse tipo de carga se tornou tema de discussão. A partir de 1975, com a iniciativa da Organização das Nações Unidas (ONU), iniciou-se a regulamentação do transporte de produtos perigosos, rotulando-se aproximadamente 2 mil produtos como perigosos com atribuição de uma numeração específica (SANTA CATARINA, 2013).

Entretanto, foi com a ocorrência de diversos acidentes que surgiram as primeiras medidas governamentais para um controle interno (SANTA CATARINA, 2013). Nacionalmente, o motivador para essa ação foi o acidente envolvendo pentaclorofenato de sódio (popularmente conhecido como Pó da China) no Rio de Janeiro, e pelo descarrilamento de uma carga de substância inflamável envolvendo explosão em Salvador, ambos em 1983 como enfatizado na Resolução N°5 (BRASIL, 1985) proposta pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).

O Brasil foi o país pioneiro na América Latina a considerar a importância do transporte de produtos perigosos e criar uma regulamentação para a atividade. Todavia, o Decreto N° 62.127, conhecido como a Lei da Faixa Branca (BRASIL, 1968), era a única referência legal existente até a data, sendo posteriormente aprovado o Decreto N° 96.0444 (BRASIL, 1988), que viria a ser uma das primeiras regulamentações para o controle efetivo do transporte de produtos perigosos no país (DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM, 2014).

Desde então, tentativas para esse tipo de controle têm sido realizadas em âmbito nacional, estadual e municipal, estabelecendo padrões de segurança, identificação do produto e documentação. Dadas essas regulamentações e pelo

elevado custo decorrente dos acidentes envolvendo produtos perigosos (tanto para o atendimento dos requisitos legais quanto pelas consequências do não cumprimento), percebe-se que o controle de expedição desses produtos é objeto de discussão no setor responsável pela manutenção da segurança pública de alguns municípios.

A exemplo disso pode-se citar a regulamentação apresentada pela Base Normativa disponibilizada pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), com as normas brasileiras para o transporte terrestre de produtos perigosos, como sinalização (identificação do tipo de produto, tamanho da fonte do texto e dimensões da placa), equipamentos (EPIs, equipamentos para sinalização e isolamento, extintores de incêndio), simbologia, terminologia e documentação (ficha de emergência e envelope para o transporte) (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2016).

Em outro exemplo, no estado do Rio Grande do Sul, a Decisão Normativa Nº 94 prevê uma política que restringe o transporte de produtos perigosos em rodovias específicas no interior do estado (RIO GRANDE DO SUL, 2015).

Entretanto, poucas cidades no Brasil possuem legislação própria tratando da circulação de cargas perigosas, como os municípios de São Paulo e Rio de Janeiro, pela Lei 11.368 (SÃO PAULO, 1993) e Decreto Nº 29.231 RIO DE JANEIRO, respectivamente. Em contrapartida, em cidades como Joinville, o transporte de produtos perigosos ainda não conta com fiscalização adequada embasada em uma política de restrição horária e de rotas específicas.

Nesse sentido, é interessante que áreas de restrição à circulação de transporte de produtos perigosos sejam identificadas no referido município. Para isso deve-se considerar fatores que buscam evitar áreas populosas, de preservação ambiental e regiões com histórico de acidentes de trânsito. Um benefício direto desse tipo de estudo é a potencial economia por parte do setor privado e público, decorrente da redução do impacto em caso de acidentes (SANTA CATARINA, 2013).

Além disso, o apoio de órgãos fiscalizadores permite minimizar, por meio das exigências legais relativas às restrições de circulação, potenciais danos em acidentes com produtos perigosos (sejam para o meio ambiente, população ou economia). Ademais, em situações emergenciais envolvendo produtos perigosos pode-se contar com o suporte de manuais que facilitam a identificação do produto envolvido e como proceder em relação à ação de resposta.

Em Joinville, Santa Catarina, o transporte de produtos perigosos é pouco fiscalizado e não conta com uma política de restrição horária e de rotas específicas para o mesmo. No presente trabalho utiliza-se um procedimento para identificação das rotas dos veículos que transportam esse tipo de produto na área urbana deste município, com o objetivo de minimizar o número total de habitantes atingido sob a hipótese de ocorrência de acidentes nas vias.

O resultado deste estudo permitirá que empresas transportadoras e órgãos fiscalizadores identifiquem e escolham as rotas que minimizem as consequências de eventuais acidentes na rede de tráfego urbano de Joinville. Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos a partir de levantamentos prévios na Defesa Civil de Joinville.

1.1 Objetivo Geral

Propor um conjunto de rotas para o transporte de produtos perigosos no município de Joinville.

1.2 Objetivos Específicos

- Identificar os fatores que contribuem para a ocorrência e a gravidade de acidentes envolvendo o transporte de produtos perigosos;
- Representar o número de habitantes potencialmente atingidos na eventualidade de ocorrência de acidentes envolvendo caminhões transportadores de produtos perigosos nas vias da rede de tráfego urbano de Joinville;
- Identificar cenários de acesso à área urbana de Joinville para atendimento de potenciais clientes consumidores de produtos perigosos no município;
- Representar a consequência de acidentes em cada cenário em termos de número de habitantes atingidos sob hipótese de ocorrência de acidentes;
- Identificar o cenário de conjunto de vias que minimiza o número de total de habitantes atingidos.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em 5 capítulos. Após esta introdução apresenta-se o capítulo 2 de revisão bibliográfica sobre os conceitos associados à classificação de produtos perigosos, aspectos legais para o transporte desses materiais e medidas de ação e resposta em caso de acidentes. Além disso, descreve-se o modelo matemático utilizado para atingir o objetivo do trabalho.

O capítulo 3 contém a caracterização do ambiente de análise, dos dados de interesse para o estudo e o procedimento de modelagem do número de habitantes atingidos sob a hipótese de ocorrência de acidentes na área urbana de Joinville.

Os resultados da aplicação do método estão descrito no quarto capítulo, incluindo uma discussão sobre a viabilidade das soluções propostas e sugestões para aplicação. Finalmente, no capítulo 5 são indicadas as considerações finais sobre o trabalho e propostas para trabalhos futuros para melhoria das soluções obtidas.

1.4 Justificativa

Na cidade de Joinville verifica-se que o transporte de produtos perigos é pouco fiscalizado e não conta com uma política de restrição horária e de rotas específicas para o mesmo. Em cidades em que esse controle já existe, percebe-se que a questão da prevenção tem recebido a devida importância.

Para isso, é apresentada uma metodologia de determinação dessas rotas levando em consideração fatores que buscam evitar áreas populosas e com históricos de elevado potencial de ocorrência de acidentes, trazendo como um dos vários benefícios, uma economia de gastos por parte do setor privado e público, por meio da redução do impacto em caso de acidentes.

Em parceria com a Defesa Civil de Joinville, foi possível obter grande parte dos dados utilizados para formulação deste trabalho. É importante ressaltar que, apesar de acidentes com produtos perigosos são pouco frequentes, sua magnitude pode ser tanta ao ponto de gerar danos irreparáveis.

2 REVISÃO TEÓRICA

Este capítulo contém os conceitos referentes ao transporte rodoviário de produtos perigosos, assim como o contexto no qual está inserida a proposta do trabalho, servindo como fundamento para a pesquisa em questão. A partir da discriminação de produto perigoso, carga perigosa, perigo e risco, são indicados os requisitos para o transporte deste tipo de carga pelo modo rodoviário quanto à sinalização e identificação do tipo de produto.

São apresentadas as regulamentações atreladas à esse tipo de transporte, sendo abordadas especificações em âmbito internacional, nacional, estadual e municipal, além da importância e atribuição de responsabilidades no atendimento às normas. Finalmente, apresenta-se uma revisão sobre a modelagem matemática considerada neste trabalho assim como a justificativa para sua utilização.

2.1 Transporte de Produtos Perigosos

Conforme esclarecido anteriormente, produto perigoso é o material que representa algum tipo de ameaça à segurança pública, ao meio ambiente, à saúde da população (AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES, 2012).

É importante ressaltar a diferença entre produto perigoso e carga perigosa, sendo o último qualquer tipo de carga que apresente alguma ameaça durante o transporte, como por exemplo, bobinas de aço por modo rodoviário (QUEIROZ, 2014). Além disso, dois conceitos estão interligados quanto aos produtos perigosos: risco e perigo. Perigo é associado ao produto em função de sua composição química e risco é a maneira como essa substância se relaciona com outro fator, como transporte e exposição (AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES, 2012).

No Brasil, as atividades de normatização e fiscalização é de responsabilidade do Ministério dos Transportes e da Secretaria Nacional de Defesa Civil (BRASIL, 2003).

Os produtos químicos perigosos para transporte são aqueles que se enquadram em uma das nove classes regulamentadas pela Resolução 420 de 2004 (BRASIL, 2004), atualizada pela Resolução 701 de 2004 (BRASIL, 2004), ambas da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Para fins de transporte, a classificação é dada pelo risco ponderado pelas atividades envolvidas em uma operação de movimentação (AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES, 2012).

As referidas classes são apresentadas a seguir (BRASIL, 2003):

- **Classe 1:** Explosivos;
- **Classe 2:** Gases Comprimidos, Liquefeitos, Dissolvidos sob Pressão ou Altamente Refrigerados;
- **Classe 3:** Líquidos Inflamáveis;
- **Classe 4:** Sólidos Inflamáveis, Substâncias Sujeitas à Combustão Espontânea, Substâncias que, em contato com a água, emitem gases inflamáveis;
- **Classe 5:** Substâncias Oxidantes e Peróxidos Orgânicos;
- **Classe 6:** Substâncias Tóxicas e Substâncias Infectantes;
- **Classe 7:** Substâncias Radioativas;
- **Classe 8:** Corrosivos;
- **Classe 9:** Substâncias Perigosas Diversas.

Segundo a NBR 7500 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), um painel de segurança de identificação de uma carga perigosa contém o número de risco (dois dígitos) e o número da ONU (quatro dígitos), esclarecendo o produto que está sendo transportado e a classe de risco, respectivamente. Além disso, o rótulo de segurança exibe o símbolo do risco, nome e número da classe ou subclasse de risco. A Figura 1 apresenta um exemplo em relação à identificação do produto em termos de sinalização disposta no veículo (rótulo de segurança e painel de segurança).

Figura 1 – Exemplo de rótulo e painel de segurança.



Fonte: PLACAR, 2016.

Acidentes no meio rodoviário possuem como principais causas falhas e erros humanos, seguidas de falhas mecânicas e problemas nas condições das vias de transporte e condições atmosféricas que resultam em redução de visibilidade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDÚSTRIA QUÍMICA, 2006).

Uma série de medidas deve ser tomada quando um acidente rodoviário envolvendo produtos perigosos ocorre, entre elas a identificação do tipo de incidente, caracterização do terreno, mensuração do risco, determinação de medidas a serem tomadas, levantamento de recursos materiais e humanos necessários e disponíveis, e a escolha da ação possível imediata (BRASIL, 2003).

Assim, o planejamento das medidas de ação e resposta em caso de acidentes com produtos perigosos é importante pois podem gerar danos irreversíveis.

2.2 Legislação







2.2.1 Internacional

COSTA (2009) esclarece que, no contexto internacional, a regulamentação para o transporte de produtos perigosos tem como referência o *Recommendations on the Transport of Dangerous Goods* (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 1976 apud COSTA, 2009), conhecido como *Orange Book*, publicado desde 1976 e com atualizações periódicas bienais. O documento contém a regulamentação para o transporte de produtos perigosos além dos padrões mínimos de segurança para o comércio mundial e em função dos modos de transporte.

O *Orange Book* serviu como fundamento para o acordo entre Brasil e os demais países do Mercosul, aquele sob representação da ANTT, para regulamentação do transporte de produtos perigosos pelo “Acordo para a Facilitação do Transporte Terrestre de Produtos Perigosos”, complementado pela Resolução MERCOSUL/GMC/RES Nº 10/00 (MERCOSUL, 2000).



Complementarmente às normas, o *Globally Harmonized System (GHS)* é um sistema internacional para comunicação sobre o perigo no transporte de produtos perigosos, que possibilita a sua classificação com o objetivo de facilitar o transporte internacional e servir de referência para os países que não possuem um sistema próprio (AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES, 2012). A Figura 3 e a Figura 2 caracterizam e ilustram os pictogramas de classificação de perigo no transporte de produtos perigosos pelo *GHS*.

Figura 2 – Classificação de Produtos Perigosos segundo GHS.

Corrosivo para Metais	
Perigos à Saúde	   
Toxicidade Aquática	

Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (2012).

Figura 3 – Classificação de Produtos Perigosos segundo o sistema *GHS*.

Perigos	Pictogramas
Explosivos	
Gases Inflamáveis, Aerossóis Inflamáveis, Líquidos Inflamáveis, Sólidos Inflamáveis, Líquidos Pirofóricos, Sólidos Pirofóricos, Substâncias e Misturas sujeitas a Auto Aquecimento, Substâncias e Misturas que em contato com água Emitem Gases Inflamáveis.	
Gases Oxidantes, Líquidos Oxidantes, Sólidos Oxidantes	
Gases sob pressão	
Substâncias e Misturas Auto-Reagentes, Peróxidos Orgânicos	

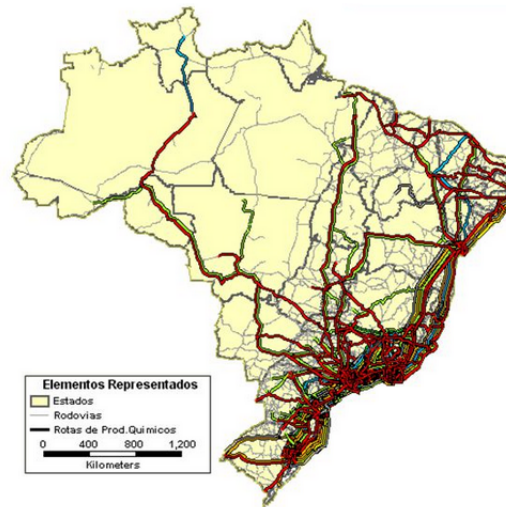
Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (2012).

2.2.2 Nacional

Atualmente, o Decreto 96.044 de 18 de Maio de 1988 (BRASIL, 1988) estabelece as diretrizes nacionais sobre os procedimentos em caso de emergências, acidentes ou avarias decorrentes do transporte de produtos perigosos no Brasil, os direitos, obrigações e responsabilidades, as condições de transporte como o itinerário, declaração do tipo de carga, quantidade, origens e destinos, da fiscalização e das infrações e penalidades.

Adicionalmente, o Instituto de Pesquisa Rodoviária do Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre (DNIT) mantém atualmente um sistema com cerca de 26.000 rotas de transporte de produtos perigosos cadastrados conforme ilustrado na Figura 4 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE, 2012).

Figura 4 – Rotas destinadas ao Transporte de Produtos Perigosos no Brasil.



Fonte: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE (2012).

Na Figura 4 observa-se que a grande maioria das rotas do transporte de produtos perigosos no país está disposta mais na região leste litorânea do país, conectando os dois extremos do país (regiões Norte e Sul).

2.2.3 Estadual

No contexto dos estados brasileiros, as seguintes regiões administrativas possuem legislação para regulamentar o transporte de produtos perigosos: em Santa Catarina sob o Decreto Estadual Nº 2.894, de 20 de maio de 1998 (SANTA CATARINA, 1998); no Rio Grande do Sul sob a Decisão Normativa Nº 94, de 21 de dezembro de 2015 (RIO GRANDE DO SUL, 2015); e no estado do Amazonas sob a Lei Nº 2.513, de 16 de dezembro de 1998 (AMAZONAS, 1998).

Essas leis têm em comum as exigências para essa movimentação, um cadastro ou autorização por parte da Secretaria do Meio Ambiente, documentação que comprove a capacitação especial do motorista para o transporte desses produtos, necessidade de equipamentos de segurança e sinalização, e uma seção dedicada às infrações e penalidades associadas ao transporte de produtos perigosos.

2.2.4 Municipal

Poucas cidades no Brasil possuem legislação própria que tratam do transporte de produtos perigosos. No município de São Paulo tem-se a lei 11.368 de 17 de maio de 1993 (SÃO PAULO, 1993) que regulamenta o transporte de produtos perigosos com diretrizes sobre rotas e horários permitidos à esse tipo de transporte, assim como medidas cabíveis em caso de descumprimento da lei. É exigido um cadastramento prévio dos transportadores de produtos perigosos e o registro anual do fluxo de cargas

que embarca, especificando classe do produto e volume anual transportado.

No município do Rio de Janeiro existe o Decreto Nº 29.231 do RIO DE JANEIRO (2008), regulamentação direcionada ao transporte de cargas em geral, com restrição horária e uma relação de vias em que o tráfego é permitido.

2.3 Modelagem Matemática

O presente trabalho tem o objetivo de propor vias exclusivas para circulação de veículos transportadores de produtos perigosos no município de Joinville, exigindo a mensuração a gravidade dos fatores que contribuem para a ocorrência de acidentes com este tipo de carga, assim como a modelagem das consequências desses acidentes.

Assim, serão definidos cenários com estimativa das respectivas consequências totais dos acidentes para viabilizar a escolha daquele que resulta no menor número de habitantes atingidos em caso de ocorrência de acidentes.

Uma vez que risco é a probabilidade de ocorrência de um evento perigoso somada à consequência deste, é necessário quantificar aquela variável para as vias candidatas ao tráfego de produtos perigosos com o objetivo de seleção daquelas que apresentem o menor número de habitantes atingidos caso um acidente ocorra.

Esse risco deve ser representado por uma equação matemática que considera aspectos como a influência do fluxo de caminhões transportadores de produtos perigosos e o histórico de acidentes nessas vias.

Com o risco estimado para cada via em estudo é possível, por meio de um algoritmo, calcular o risco total no município nas vias que utilizadas pelos veículos que transportam produtos perigosos de um dos acessos à cidade pela rodovia até destinos específicos consumidores de produtos perigosos.

As etapas de formulação do risco, assim como o algoritmo utilizado neste trabalho para cálculo das rotas que minimizam o número total de habitantes atingidos mediante um acidente, são apresentados detalhadamente nas próximas seções.

2.3.1 Modelagem de risco

As pesquisas de RAMOS (1997), COSTA (2009) e HARWOOD, VINER e RUSSELL (1990) apresentam métodos para mensurar o risco no transporte de produtos perigosos pelo modo rodoviário.

Em sua dissertação, RAMOS (1997) propõe a avaliação e seleção de rotas para o transporte de produtos perigosos na malha viária do estado de Santa Catarina. Por meio de histórico de acidentes, volume de tráfego e densidade demográfica, um índice de risco é definido para comparar e apontar as melhores rotas.

COSTA (2009) aplica um método para a definição da sub-rede de transporte de produtos perigosos em áreas urbanas por meio de um Método de Análise Hierárquica.

Sua aplicação foi no município do Rio de Janeiro, considerando aspectos como hierarquia da vias, limite de velocidade, densidade populacional, índice de acidentes, meio ambiente e volume de tráfego.

O procedimento proposto por HARWOOD, VINER e RUSSELL (1990) apresenta um modelo a partir do histórico de acidentes envolvendo caminhões para a seleção de rotas adequadas ao tráfego de produtos perigosos. Os autores consideram variáveis como extensão, hierarquia, e densidade demográfica das vias candidatas para o desenvolvimento do modelo.

Tendo em vista as pesquisas existentes, admitiu-se neste trabalho a proposta de HARWOOD, VINER e RUSSELL (1990) para a formulação do risco mediante as informações disponíveis na cidade de Joinville. Assim, de acordo com aquele autor, para cada segmento da via é necessário as seguintes informações:

1. Fluxo de acidentes envolvendo caminhões;
2. Probabilidade de ocorrer vazamento caso ocorra algum acidente;
3. Comprimento do segmento;
4. Probabilidade de ocorrer vazamento no segmento;
5. Densidade populacional;
6. Largura da zona de impacto;
7. Total de pessoas expostas;
8. Pessoas expostas por metro;
9. Risco populacional.

No trabalho de HARWOOD, VINER e RUSSELL (1990) os itens 1 e 2 foram obtidos pelo histórico de acidentes. A probabilidade de ocorrer vazamento no segmento (item 4) é a combinação dos itens 1, 2 e 3, ou seja, a multiplicação do fluxo de acidentes envolvendo caminhões, pela probabilidade de ocorrer vazamento em caso de acidente, multiplicados pelo comprimento do segmento.

A largura da zona de impacto é a extensão adotada como alcance da consequência do acidente. Por exemplo, se a largura da via é de cinco metros, a pessoa ou objeto que estivesse a essa distância ou menos do local do acidente, em qualquer direção, seria atingida.

O total de pessoas expostas refere-se à multiplicação da extensão do segmento pela largura da zona de impacto e a densidade populacional naquela região. Dado que o número de pessoas expostas por metro linear é a divisão do item 7 pelo comprimento do segmento, o risco populacional é resultado da multiplicação do número de pessoas expostas por metro pela probabilidade de ocorrer vazamento naquele segmento. Assim, o resultado do procedimento descrito por HARWOOD, VINER e RUSSELL (1990) é o número de pessoas por metro linear expostas às consequências de um acidente.

Considerando o método proposto por HARWOOD, VINER e RUSSELL (1990) e as informações disponíveis para o município de Joinville, os itens anteriores foram

reorganizados da seguinte forma para aplicação ao contexto do município.

1. Número de acidentes total;
2. Probabilidade de ocorrer acidente com caminhão;
3. Probabilidade de ocorrer acidente na via;
4. Probabilidade de ocorrer acidente na via com caminhão;
5. Comprimento do segmento;
6. Densidade populacional;
7. Largura da zona de impacto;
8. Risco populacional.

O número de acidentes total refere-se às contagens discriminadas para cada via provenientes de informações da Defesa Civil de Joinville. Quanto às probabilidades, o item 2 refere-se somente a parcela de participação de acidentes com caminhão em relação ao total, o item 3 refere-se à parcela de participação de dada via em relação ao total e item 4 é resultado da multiplicação dos itens 2 e 3.

O comprimento do segmento é dado pela divisão da extensão total da via pelo número de segmentos que a compõe. A densidade populacional é aquela em que o segmento está inserido referente à cada bairro. A largura da zona de impacto é semelhante ao estimado no trabalho de HARWOOD, VINER e RUSSELL (1990).

Portanto, o risco populacional é resultado da multiplicação dos itens 4, 5, 6 e 7, cuja unidade é número de pessoas potencialmente expostas em caso de acidentes.

Do ponto de vista de definição de uma rede de tráfego, os segmentos de via correspondem aos arcos da rede e o número de pessoas potencialmente atingidas pode ser interpretado como o custo caso um acidente ocorra. Assim, a ponderação dos arcos rede pelo risco populacional viabiliza o cálculo do conjunto de vias que minimiza o risco total caso sejam utilizadas em uma rota, considerando múltiplos acessos de Joinville pela rodovia e os destinos que demandam as cargas.

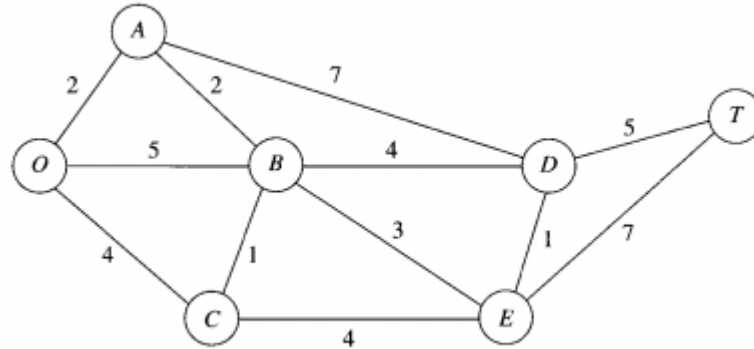
Nessas condições é necessário esclarecer os modelos e métodos existentes para o cálculo de caminho de mínimo custo em redes de transporte, assim como os algoritmos que podem intermediar a sua solução conforme tratado na próxima.

2.3.2 Redes de Transporte

Um conjunto de pontos que estejam conectados por segmentos compõem uma estrutura denominada rede (SHEFFI, 1985), que pode ser utilizada para representar um sistema de transporte onde, por exemplo, os pontos (nós) são origens de viagens e os segmentos (arcos) representam os caminhos que conectam esses locais. Assim, uma rede (ou grafo) é um conjunto de nós (ou vértices) e arcos (ou arestas) que conectam esses nós (BOAVENTURA NETO, 1979) e, para cada arco, é possível associar um custo, resultando um grafo ponderado.

A Figura 5 exemplifica os elementos do grafo, cujos nós são representados pelo alfabeto, os arcos pelas linhas e os custos pelos números das respectivas ligações.

Figura 5 – Exemplo de grafo ponderado.



Fonte: HILLIER; LIEBERMAN, 2006.

Neste trabalho, a rede de transporte é composta pelo conjunto de vias candidatas à circulação de veículos contendo produtos perigosos (arcos) e o conjunto de locais de interesse, como acessos à cidade, indústrias e distribuidoras de GLP (nós), no município de Joinville. O custo atribuído a cada arco será representado pelo risco populacional calculado pela adaptação do método proposto por HARWOOD, VINER e RUSSELL (1990), considerando aspectos como histórico de acidentes e densidade populacional do município.

2.3.3 Caminho mínimo

Dado grafo ponderado, a identificação do caminho de menor custo entre uma origem O e um destino de interesse D caracteriza um problema de caminho mínimo, cujo custo total é a soma dos custos de cada aresta percorrida (GERSTING, 1995).

Seja c_{ij} o custo da aresta entre o nó i e o nó j , e x_{ij} uma variável de decisão binária que pode assumir os valores 1, se a aresta é percorrida entre o nó i e o nó j e 0, caso contrário. O modelo matemático do problema do caminho mínimo é caracterizado entre a Equação (2.1) e a Equação (2.4) LANGEVIN e SOUMIS (1990).

O problema de caminho mínimo pode ser aplicado em diferentes variações, como de uma origem para múltiplos destinos, múltiplas origens para um destino, de múltiplas origens para múltiplos destinos, ou entre todos os nós de um grafo.

$$\text{minimizar } z = \sum_i \sum_j c_{ij} \cdot x_{ij} \quad (2.1)$$

$$\sum_i x_{ij} = 1 \quad \forall \quad j = 1, \dots, n \quad (2.2)$$

$$\sum_j x_{ij} = 1 \quad \forall \quad i = 1, \dots, n \quad (2.3)$$

$$\sum_{i,j \in Q} x_{i,j} \leq |Q| - 1 \quad \forall \quad Q \subseteq \{1, \dots, n\} \quad e \quad 2 \leq |Q| \leq n - 1 \quad (2.4)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (2.5)$$

A função objetivo (2.1) minimiza o custo total no caminho entre a origem O e o destino D . As restrições de (2.2) e (2.3) asseguram que cada nó seja visitado apenas uma vez no caminho e as restrições de (2.4) devem ser incluídas para evitar sub-rotas. Finalmente, (2.5) impõe o domínio das variáveis de decisão para valores 0 ou 1.

Para problemas de pequeno porte, com poucos nós e arcos, o modelo matemático indicado anteriormente é eficaz. Porém, para redes de grande porte, passa a ser inviável devido ao elevado tempo exigido para obtenção da solução ótima.

Assim, é preciso recorrer a algoritmos que viabilizam a obtenção de solução para o problema em tempo reduzido. Para esse propósito existem, por exemplo, o Algoritmo de Dijkstra e Floyd-Warshall, que resolvem problemas de grande porte para o caso de uma origem e um destino ou entre todos os pares de nós da rede, respectivamente (CORMEN; LEISERSON; RIVEST, 1990).

2.3.4 Algoritmo de Dijkstra

O Algoritmo de Dijkstra (DIJKSTRA, 1976) viabiliza o cálculo do caminho de custo mínimo em um grafo cujos arcos sejam unidirecionais ou bidirecionais e respectivos custos sejam não-negativos. O algoritmo funciona da seguinte forma: para encontrar o menor caminho de um vértice X para um vértice Y é preciso construir um conjunto de nós que representa a rede de interesse, iniciando a partir da origem X . Assim, na primeira iteração, o nó inicial se conecta a um novo nó por meio de um arco que corresponde ao menor caminho entre eles.

Isso é feito à cada iteração, conectando o nó anterior ao vizinho mais próximo ainda não visitado z por meio de vértices que representam a menor distância $d[z]$ até alcançar o nó de interesse (Y). A cada nó visitado, armazena-se o vértice $s[z]$ que representa o caminho percorrido à cada iteração s , fazendo-se o mesmo com as distâncias, de forma à obter no final a distância total percorrida de menor valor d (GERSTING, 1995).

O pseudocódigo a seguir caracteriza o algoritmo para cálculo do caminho mínimo entre um vértice inicial e todos os demais nós de um grafo.

Figura 6 – Algoritmo de Dijkstra.

ALGORITMO *CaminhoMínimo*

procedure *CaminhoMínimo*(*A*: matriz $n \times n$; *x*, *y*: vértices);

(Algoritmo de Dijkstra — *A* é a matriz de adjacências modificada de um grafo simples conexo com pesos positivos; *x* e *y* são vértices do grafo; a procedure apresenta o menor caminho de *x* a *y* e a distância deste caminho)

var

IN: conjunto de vértices; {menor caminho conhecido a partir de *x*}
z, *p*: vértice; {vértices temporários}
d: vetor de inteiros; {distância a partir de *x* usando os vértices de *IN*}
s: vetor de vértices; {vértice anterior no caminho mínimo}
DistAnterior: integer; {distância a ser comparada}

begin

{inicia o conjunto *IN* e os vetores *d* e *s*}

IN := {*x*};

d[*x*] := 0;

for todos os vértices *z* que não pertençam a *IN* **do**

begin

d[*z*] := *A*[*x*, *z*];

s[*z*] := *x*;

end;

{processa os vértices de *IN*}

while not (*y* in *IN*) **do**

begin

 {inclui o vértice de distância mínima que ainda não está em *IN*}

p := vértice *z* que não pertença a *IN* com *d*[*z*] mínima;

IN := *IN* ∪ {*p*};

 { recalcula *d* para vértices que não pertençam a *IN*, ajusta *s* se necessário }

for todos os vértices *z* que não pertençam a *IN* **do**

begin

DistAnterior := *d*[*z*];

d[*z*] := min (*d*[*z*], *d*[*p*] + *A*[*p*, *z*]);

if not (*d*[*z*] = *DistAnterior*) **then**

s[*z*] := *p*;

end;

end; {while}

{Escreve os vértices do caminho}

 write ('Em ordem inversa, o caminho é: ');

 write (*y*);

z := *y*;

repeat

 write(*s*[*z*]);

z := *s*[*z*];

until *z* = *x*;

{Escreve distância do caminho}

 write('A distância do caminho é ', *d*[*y*]);

end;

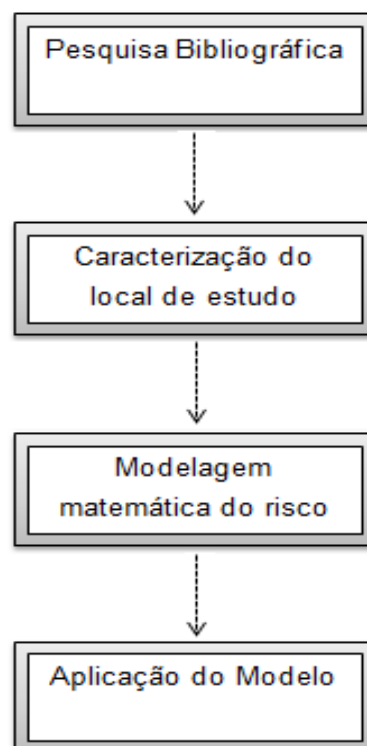
Fonte: GERSTING, 1995.

3 MÉTODO

Neste capítulo é apresentado o método para determinação das rotas mais adequadas ao transporte de produtos perigosos, detalhando-se o procedimento de obtenção dos dados e cálculo do risco populacional.

Atualmente, a cidade carece de medidas de monitoramento e especificação das áreas adequadas para circulação de caminhões com produtos perigosos no perímetro urbano. Assim, de modo a alcançar os objetivos propostos neste trabalho, é necessário estabelecer o método utilizado nesta pesquisa, caracterizada como exploratória quantitativa, pela análise de dados e informações que caracterizem o município de forma a possibilitar a definição das variáveis necessárias ao estudo. A Figura 7 caracteriza a sequência metodológica considerada neste trabalho.

Figura 7 – Sequência metodológica do problema abordado.



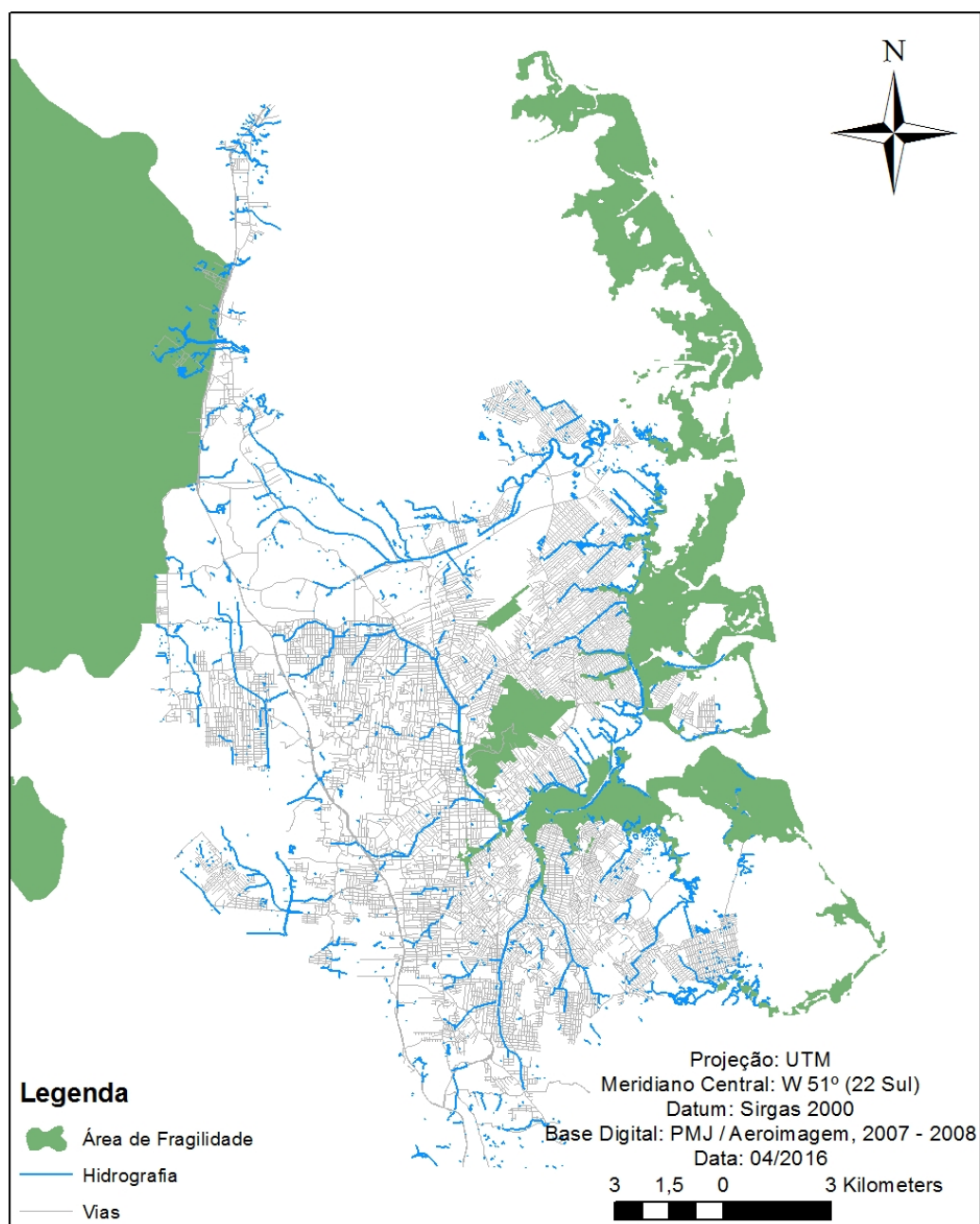
Fonte: elaborado pelo autor, 2016.

3.1 Aquisição e Análise dos Dados

A influência exercida pelo transporte de produtos perigosos em determinada região pode representar riscos à população potencialmente exposta, assim como os recursos ambientais e materiais.

O município de Joinville é caracterizado pelo relevo plano, com rios e mangues que impõem áreas de fragilidade ambiental no ambiente urbano, cujas vias podem ser observadas em relação à ocupação do solo e hidrografia na Figura 8.

Figura 8 – Rede viária, hidrografia e áreas de fragilidade ambiental de Joinville.



Fonte: Defesa Civil de Joinville, 2016

Para a definição da rede foi utilizado um banco de dados que representa as vias e os bairros do município de Joinville em um sistema de informação georreferenciado fornecido pela Defesa Civil de Joinville. Informações sobre localização georreferenciada de pontos de interesse como indústrias potenciais receptoras/fornecedoras de produtos perigosos e distribuidoras de GLP também foram fornecidas pela entidade.

Com o objetivo de analisar esse risco, faz-se necessário a utilização de dados sobre acidentes, em especial o histórico, para a adequada caracterização do ambiente de estudo. Assim, em contato com a Secretaria de Proteção Civil e Segurança Pública foi possível obter dados coletados pelo Corpo de Bombeiros Voluntários de Joinville.

O histórico de acidentes é composto por uma classificação sobre o tipo de colisão (carro e moto, carro e obstáculo fixo, entre outros), assim como o número de acidentes em cada via de Joinville. A partir do histórico é possível identificar as vias que possuem maior número de acidentes e a quantidade que envolve caminhões no período de um ano.

3.2 Modelo Proposto

Com o objetivo de propor um conjunto de vias para a circulação de caminhões transportadores de produtos perigosos na região urbana de Joinville será utilizado o conceito de caminho mínimo resultante do Algoritmo de Dijkstra, cujos custos nas arestas serão representados por um risco equivalente ao número de habitantes atingidos na hipótese de ocorrência de um acidente.

Assim, para estimar esse valor de risco, é necessário considerar um modelo que resulte no número de pessoas atingidas em caso de acidentes envolvendo produtos perigosos decorrentes desse tipo de transporte. Para isso, são consideradas variáveis sobre o tipo de via por onde os veículos circularão, a probabilidade de ocorrência de um acidente e a amplitude da área de impacto.

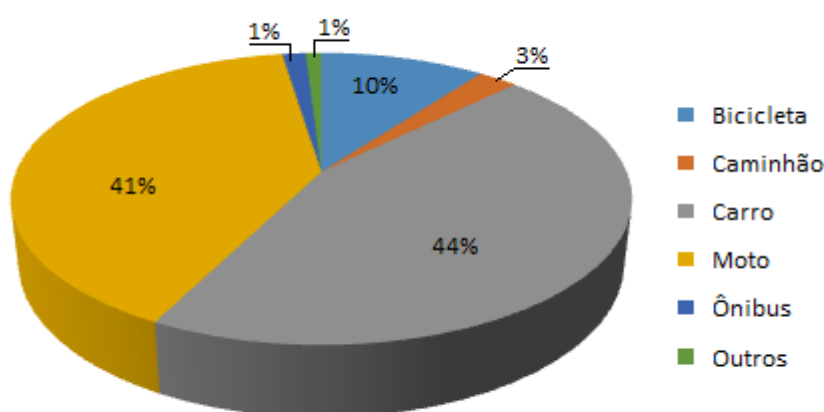
O modelo matemático utilizado é uma adaptação da proposta de HARWOOD, VINER e RUSSELL (1990), tal que os recursos disponíveis para aplicação no contexto de Joinville resultaram na necessidade de levantamento ou estimativa dos itens indicados na seção 2.3.1, indicados a seguir e descritos nas próximas seções.

1. Número de acidentes total;
2. Probabilidade de ocorrer acidente com caminhão;
3. Probabilidade de ocorrer acidente na via;
4. Probabilidade de ocorrer acidente na via com caminhão;
5. Comprimento do segmento;
6. Densidade populacional;
7. Largura da zona de impacto;
8. Risco populacional;

3.2.1 Número de acidentes total

O histórico de acidentes obtido para este estudo contém uma relação de vias de Joinville e os respectivos números de acidentes no ano de 2015. No período foram observados 4.399 acidentes no município cuja proporção por tipo de veículo pode ser observada na Figura 9.

Figura 9 – Registro de acidentes com vítimas na cidade de Joinville (2015).



Fonte: Corpo de bombeiros voluntários de Joinville, 2015

Na Figura 9 é possível observar que a grande parcela dos acidentes se dão pelos carros e motos, somando ao total 85 por cento de todos os tipos de acidentes. A fatia que representa acidentes com caminhões está identificada como o terceiro maior valor, com 10 por cento do total. Com o registro de acidentes diferenciado para cada tipo de veículo, é possível calcular a probabilidade de ocorrências que envolvem um ou mais caminhões.

3.2.2 Probabilidade de ocorrer acidente com caminhão

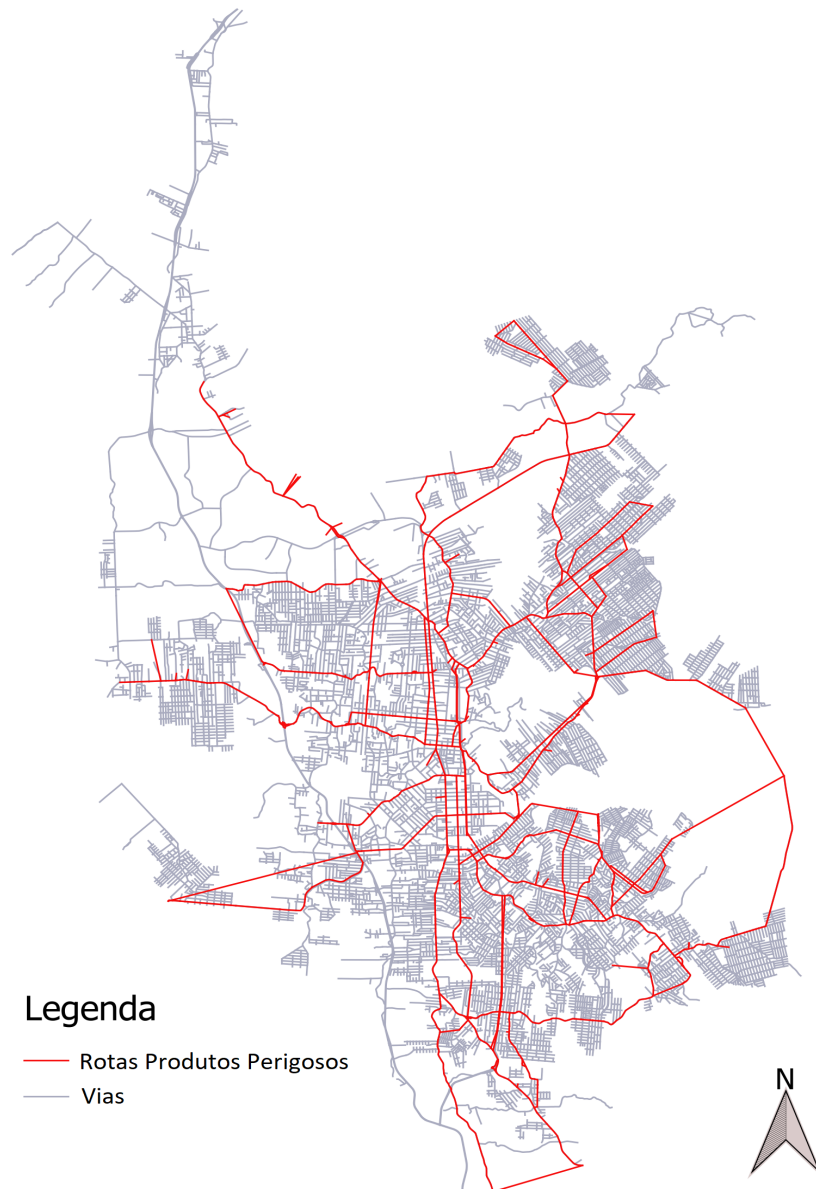
A caracterização das vias por tipo de acidente e a quantidade de ocorrências é a etapa inicial para a determinação da taxa de acidentes com caminhões. Utilizando os dados disponíveis no município é possível realizar a classificação da rede de tráfego de acordo com o aspecto número de acidentes.

Com o objetivo de sintetizar a rede de tráfego para as vias de maior representatividade no município, optou-se pela seleção exclusiva daquelas com 10 ou mais acidentes no ano de 2015.

Assim, 55 das 575 vias do município foram selecionadas resultando em uma base de dados composta por 3.148 acidentes no ano. A distribuição espacial das vias

selecionadas pode ser observada na Figura 10 a seguir, destacadas do mapa viário da região urbana de Joinville.

Figura 10 – Mapa de vias de Joinville com 10 ou mais acidentes em 2015.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Pelo fato das informações sobre os acidentes não serem especificadas quanto ao tipo de carga transportada considerou-se o número total de acidentes envolvendo caminhões nas vias indicadas na figura anterior, dado que usualmente são os veículos mais comuns para transporte de produtos perigosos.

A Tabela 1 apresenta a quantidade de acidentes envolvendo caminhões e outros veículos ou obstáculos indicados na base de dados.

Tabela 1 – Quantitativo de colisões com caminhões nas vias selecionadas de Joinville.

Tipo de Acidente	Ocorrências (N_i^c)
Caminhão x Bicicleta	16
Caminhão x Caminhão	4
Caminhão x Carro	38
Caminhão x Moto	49
Caminhão x Obstáculo Fixo	4
Caminhão x Ônibus	4
Caminhão x Pedestre	4
Caminhão x Rio	1
Acidentes envolvendo caminhões	120
Total de acidentes (N_{total})	3148

Fonte: Corpo de Bombeiros Voluntários de Joinville, 2015.

Essa classificação permite estimar a parcela de acidentes envolvendo caminhões quanto ao tipo de colisão proporcionalmente ao total de acidentes em Joinville nas vias selecionadas conforme indicado na Equação 3.1.

$$P_i^c = \frac{N_i^c}{N_{total}} \quad (3.1)$$

onde P_i^c é a probabilidade de ocorrência do tipo i envolvendo caminhão, N_i^c é o número de acidentes do tipo i envolvendo caminhão e N_{total} é número total de acidentes.

Assim, para cada tipo de acidente envolvendo caminhões obtém-se a probabilidade de ocorrência conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2 – Probabilidade de acidentes envolvendo caminhão.

Tipo de Acidente	Ocorrências (N_i^c)	Probabilidade (P_i^c)
Caminhão x Bicicleta	16	0,0051
Caminhão x Caminhão	4	0,0013
Caminhão x Carro	38	0,0121
Caminhão x Moto	49	0,0156
Caminhão x Obstáculo Fixo	4	0,0013
Caminhão x Ônibus	4	0,0013
Caminhão x Pedestre	4	0,0013
Caminhão x Rio	1	0,0003
Acidentes envolvendo caminhões	120	0,0381
Total de acidentes	3148	1,0000

Fonte: Corpo de Bombeiros Voluntários de Joinville, 2015.

3.2.3 Probabilidade de ocorrer acidente na via

A partir da relação de vias com 10 ou mais acidentes é possível calcular a probabilidade de ocorrências em uma via específica em função do número total de acidentes de 2015. A Tabela 3 permite exemplificar o procedimento considerando o número de acidentes em cinco vias de Joinville.

Tabela 3 – Número de acidentes por logradouro de Joinville.

Via	Nº Acidentes
Avenida Doutor Albano Schulz	12
Avenida Getulio Vargas	19
Avenida Jose Vieira	18
Avenida Jupiter	18
Avenida Kurt Meinert	15
Total de acidentes (N_{total})	3148

Fonte: Corpo de Bombeiros Voluntários de Joinville, 2015.

A Equação 3.2 viabiliza o cálculo da probabilidade de ocorrência de acidentes em cada logradouro do município..

$$P_v = \frac{N_v}{N_{total}} \quad (3.2)$$

onde P_v é a probabilidade de ocorrer acidente na via v , N_v é o número de acidentes na via v e N_{total} é o número total de acidentes no município.

Nessas condições, a probabilidade de ocorrência de acidentes nas vias exemplificadas anteriormente é indicada na Tabela 4, cujo procedimento foi replicado para todas as 55 vias em estudo no município.

Tabela 4 – Probabilidade de ocorrer acidente na via específica.

Via	Nº Acidentes	Probabilidade (P_v)
Avenida Doutor Albano Schulz	12	0,0038
Avenida Getulio Vargas	19	0,0060
Avenida Jose Vieira	18	0,0057
Avenida Jupiter	18	0,0057
Avenida Kurt Meinert	15	0,0048
Total de acidentes (N_{total})	3148	1,0000

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

3.2.4 Probabilidade de ocorrer acidente na via com caminhão

A probabilidade ocorrência de um acidente em uma via específica e deste ter envolvimento com caminhão é dada pela multiplicação do valor total de probabilidade de ocorrência de acidentes envolvendo caminhões ($\sum_i P_i^c = 0,0381$ da Tabela 2) pelos respectivos valores apresentados exemplificados na Tabela 4. Ou seja, a probabilidade P_v^c de ocorrência de acidentes na via v envolvendo caminhões pode ser calculada por

$$P_v^c = \sum_i P_i^c \cdot P_v = 0,0381 \cdot P_v \quad (3.3)$$

A aplicação da equação anterior aos exemplos de vias indicadas anteriormente resulta nos valores da Tabela 5, cujo procedimento foi estendido para todas as vias selecionadas de Joinville.

Tabela 5 – Probabilidade de ocorrer acidente na via específica com caminhão.

Via	Nº Acidentes	P_v	P_v^c
Avenida Doutor Albano Schulz	12	0,0038	0,0001
Avenida Getulio Vargas	19	0,0060	0,0002
Avenida Jose Vieira	18	0,0057	0,0002
Avenida Jupiter	18	0,0057	0,0002
Avenida Kurt Meinert	15	0,0048	0,0002

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

3.2.5 Comprimento do segmento

A partir dos dados georreferenciados fornecidos pela Defesa Civil de Joinville observou-se que o banco de dados caracterizava as vias divididas em segmentos. Essa divisão em segmentos busca obter partições da via que apresentem a mesma característica, podendo assim seu comprimento variar. Assim, dado que cada segmento de via possui um comprimento específico, cada via que compõe a rede no mapa é composta por um número variável de segmentos.

No intuito de facilitar o cálculo das extensões dos segmentos buscou-se padronizar o seu tamanho utilizando extensão total da via a qual ele pertence e dividindo este valor pelo número de segmentos que compõe essa via.

Assim, cada via no mapa possui um número de segmentos de mesmo comprimento (extensão) que quando somados fornecem o comprimento total da via.

3.2.6 Densidade Populacional

A densidade populacional foi obtida para cada bairro a partir da respectiva população total da região dividida pela área territorial em que está distribuída. O mapa

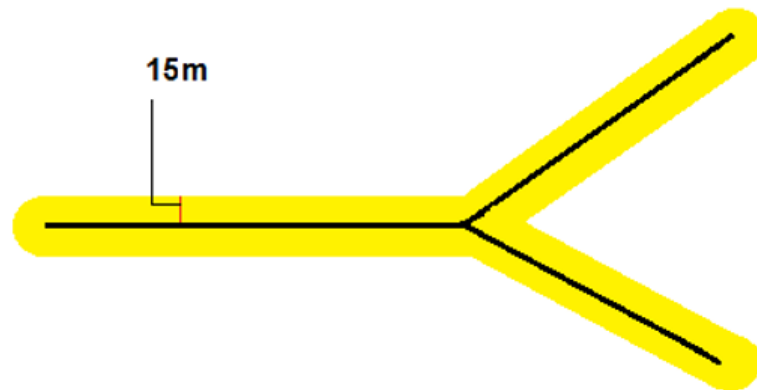
de vias georeferenciadas foi utilizado simultaneamente as áreas de dos bairros, que continham os respectivos atributos de densidade populacional.

Assim, com o auxílio de um software de geoprocessamento essas duas camadas georeferenciadas foram unidas, produzindo uma terceira camada de linha representando as vias urbanas com o atributo adicional de densidade populacional no local onde estão inseridas.

3.2.7 Largura da zona de impacto

A largura da zona de impacto refere-se à distância de alcance da consequência do acidente envolvendo produto perigoso, sendo considerada neste trabalho igual a 15 metros conforme exemplificado na Figura 11.

Figura 11 – Largura da zona de impacto.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

3.2.8 Risco Populacional

Finalmente, a estimativa do risco em cada via v da rede de tráfego de Joinville em termos de número de habitantes potencialmente atingidos sob a hipótese de ocorrência de um acidente envolvendo produtos perigosos foi realizado segundo a Equação 3.4.

$$C_v = P_v^c \cdot D_v \cdot A_v \quad (3.4)$$

onde C_v é o risco (custo) no arco v (*habitantes*), P_v é a probabilidade total de ocorrência de acidente envolvendo um caminhão no arco v , D_v é a densidade populacional (*habitantes/km²*) referente ao arco v e A_v é a área (*km²*) potencialmente atingida pelos efeitos da ocorrência de um acidente envolvendo pelo menos um caminhão.

A área A_v refere-se à multiplicação da largura da zona de impacto pelo comprimento do segmento. Assim, é possível calcular o risco de cada segmento

da rede e adicionar essa informação na base de dados do sistema de informação geográfica que representa a rede de transporte em estudo.

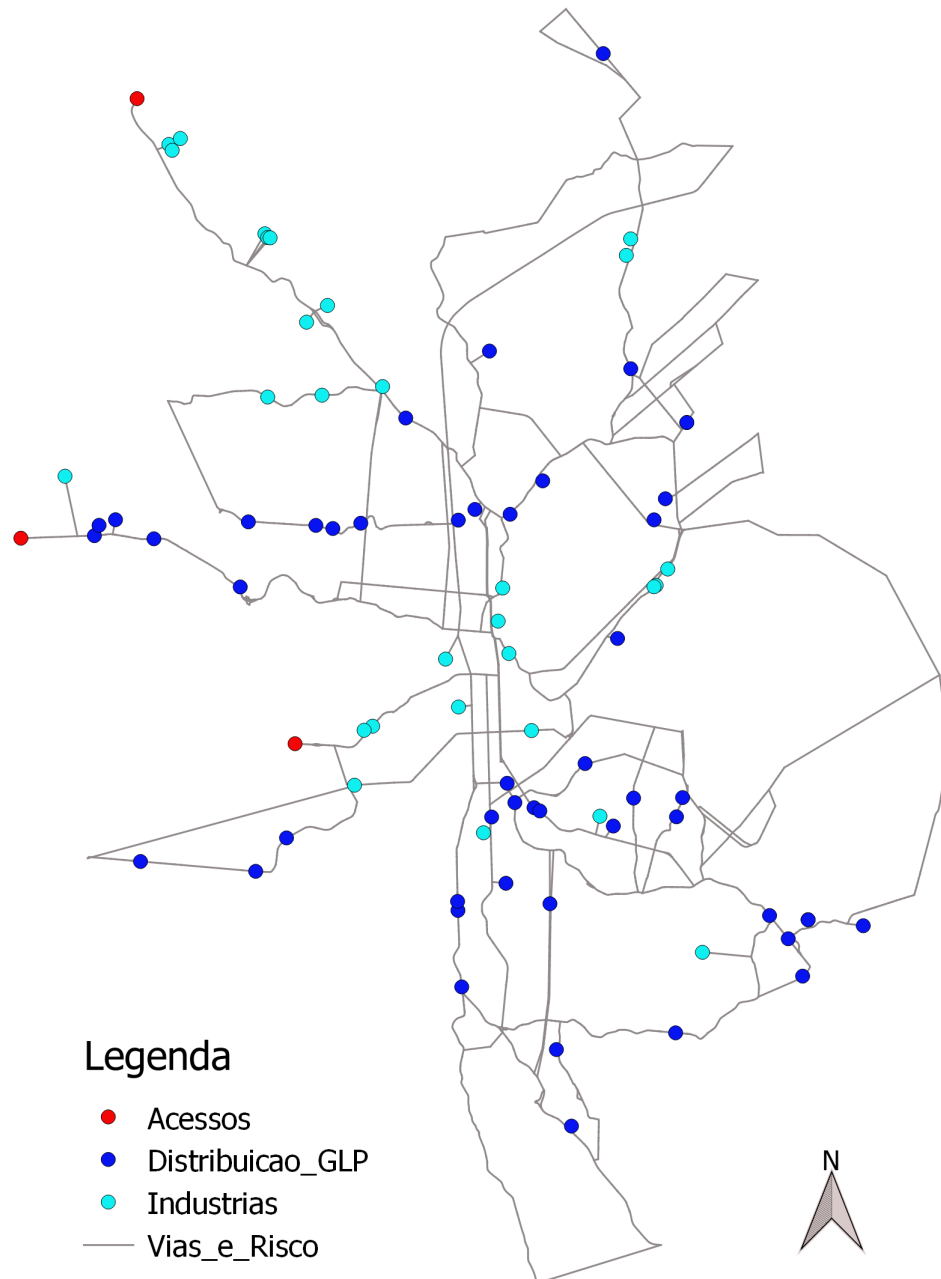
3.3 Origens e destinos da rede de tráfego

Na sequência do método considerado neste trabalho, os nós de origens (acessos à cidade) e os nós de destinos – indústrias que demandam produtos perigosos e estabelecimentos de distribuição de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) – foram adicionados à rede viária georeferenciada, cujos arcos (vias) tinham seus respectivos riscos incluídos na etapa anterior. A Figura 12 ilustra a localização dos nós de origens e de destinos atrelados à rede viária.

Nessa mesma rede viária foram construídos mapas de calor para ilustrar a concentração populacional, a distância dos segmentos e o risco de cada arco calculados anteriormente. Esses mapas podem ser analisados na Figura 13 a seguir, a partir dos quais é possível concluir que vias mais extensas possuem seu risco diluído e que áreas mais populosas possuem um risco maior.

No próximo capítulo são apresentados os resultados da aplicação do Algoritmo de Dijkstra mediante os riscos calculados para as vias da rede de tráfego de Joinville e diferentes combinações de permissão de acesso à região urbana do município.

Figura 12 – Rede de transporte de Joinville com pontos de origem e destino.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 13 – Magnitude dos parâmetros para cálculo de risco nas vias da rede de tráfego de Joinville.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

4 RESULTADOS

A Figura 14 representa simplificada a rede de transporte considerada neste estudo, sobre a qual foram calculados os custos nos arcos referentes ao número de habitantes atingidos na eventualidade de ocorrência de um acidente. Esta rede representa o conjunto de ruas de maior movimentação na cidade.

Figura 14 – Rede de transporte de Joinville.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A partir da rede inicial foram estabelecidos cenários que combinam diferentes possibilidades de acesso à área urbana de Joinville dos caminhões provenientes da rodovia BR-101: pela Rua Dona Francisca (Acesso Norte), pela Rua XV de Novembro (Acesso Centro) e Rua Anita Garibaldi (Acesso Sul).

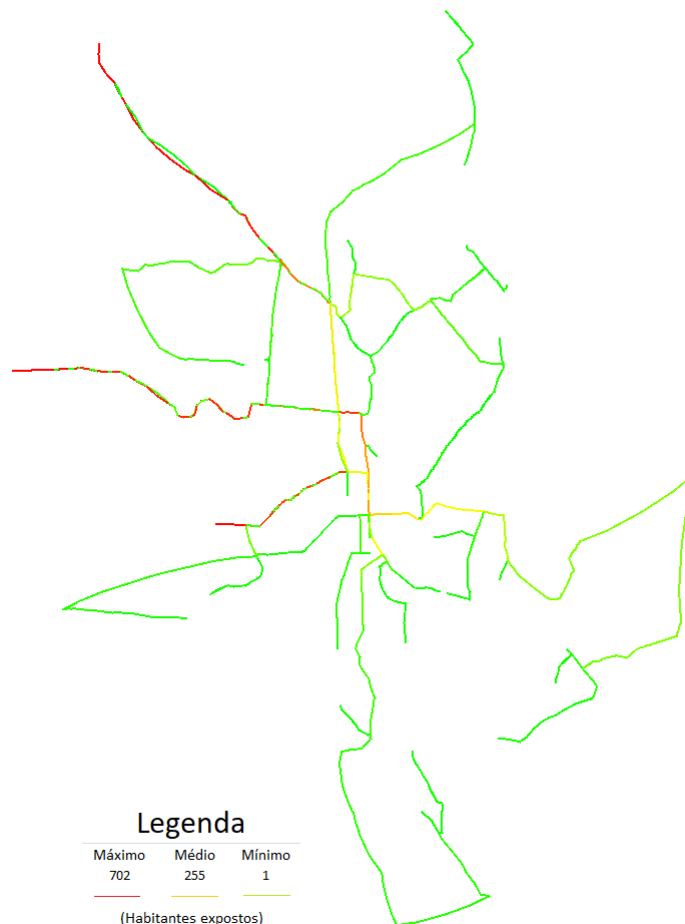
As seções a seguir contém a caracterização dos cenários: Acessos Norte, Centro e Sul; Acessos Centro e Sul; Acessos Norte e Centro; Acessos Norte e Sul; Acesso Centro; Acesso Sul; Acesso Norte.

O Algoritmo de Dijkstra foi aplicado a cada um dos cenários para identificação do caminho que resulta no menor número de habitantes potencialmente atingidos (risco) sob a hipótese de ocorrência de um acidente envolvendo caminhão transportando produtos perigosos nos arcos que o compõe. O risco total calculado corresponde à soma do risco estimado nos caminhos de menor risco entre o(s) acesso(s) considerados o os nós de demanda por produtos.

4.1 Cenário 1: Acessos Norte, Centro e Sul

Este cenário caracteriza a permissão de entrada de veículos transportadores de produtos perigosos pelos três acessos considerados. Nesse caso, a soma dos riscos resultantes da combinação de vias que conecta a rodovia pelos três acessos à todos locais de interesse minimizando o risco total pode ser verificado na Figura 15.

Figura 15 – Cenário com permissão de entrada pelos acessos Norte, Centro e Sul.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Nesse cenário o risco mínimo calculado foi de 54.187,3 pessoas potencialmente expostas. Na Figura 15 , a vias próximas dos acessos possuem a coloração destacado em vermelho por apresentarem maiores riscos, uma vez que concentram o volume inicial de veículos transportadores de produtos perigosos. As vias destacadas em tons de amarelo apresentam riscos moderados, e as em verde, menor risco.

4.2 Cenário 2: Acessos Centro e Sul

Este cenário considera a permissão da entrada de veículos transportadores de produtos perigosos por meio dos acessos Centro (Rua Benjamin Constant) e Sul (Rua XV de Novembro). Nesse caso, a Figura 16 representa a combinação de vias que minimiza o número de habitantes afetados na eventualidade de acidentes quando os dois acessos da rodovia aos locais de interesse são liberados.

Figura 16 – Cenário com permissão de entrada pelos acessos Centro e Sul.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Neste cenário o risco calculado foi de 40.838,4 pessoas potencialmente expostas, sendo que os arcos que apresentam maior número de habitantes afetados são aqueles referentes aos acessos da Rua Benjamin Constant e Rua XV de Novembro destacados na cor vermelha. As vias da região central do município indicam riscos moderados de efeito sobre a população, em tons de amarelo, e as vias periféricas apresentam menores riscos, destacados pelos tons de verde.

4.3 Cenário 3: Acessos Norte e Centro

Neste cenário foi permitida a entrada de veículos pelos acessos Norte (Rua Dona Francisca) e Centro (Rua Benjamin Constant). Neste caso, a combinação de vias que minimiza os riscos pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 – Cenário com permissão de entrada pelos acessos Norte e Centro.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Nesse cenário o risco calculado foi de 39.506,3 pessoas potencialmente

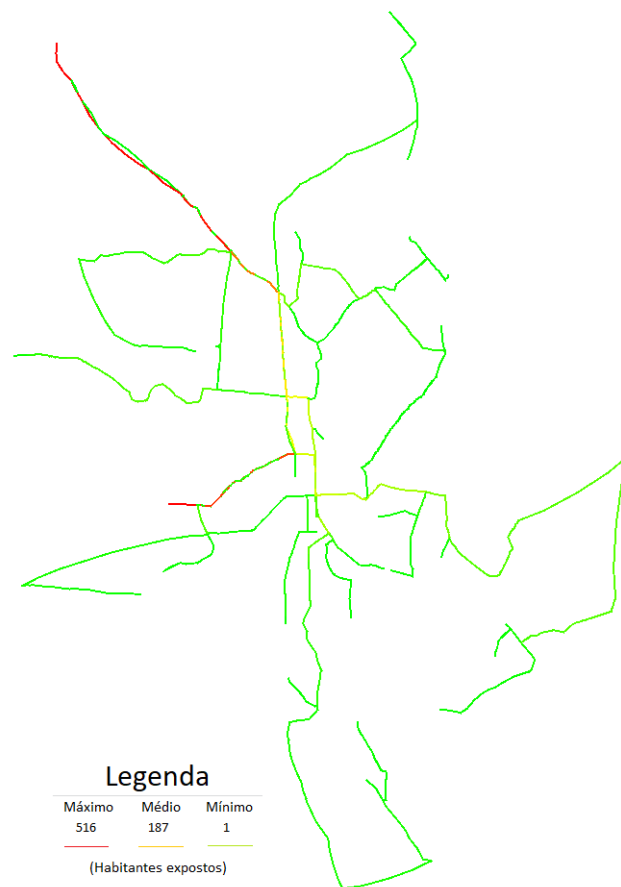
expostas, geograficamente dispersos conforme os tons de vermelho para maior risco, justamente nas vias de acesso à região urbana e com algum destaque na região central, tons amarelos também concentrados no centro e tons em verde nos bairros mais ao Norte e Sul da cidade.

4.4 Cenário 4: Acessos Norte e Sul

este cenário admite a entrada de veículos transportadores de produtos perigosos por meio dos acessos Norte (Rua Dona Francisca) e Sul (Rua XV de Novembro). Nesse caso, a combinação de vias para circulação dos veículos de modo a minimizar o risco total na rede é representada na Figura 18.

Nesse cenário o risco calculado foi de 28.029 pessoas potencialmente expostas tal que, como esperado, as vias próximas ao acesso Norte e Sul são as que apresentam maior risco, em tons de vermelho, as vias da região central apresentam risco menor, indicada em tons de amarelo, e as vias periféricas novamente apresentam cores em tons de verde que caracterizam menores riscos à população.

Figura 18 – Cenário com permissão de entrada pelos acessos Norte e Sul.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

4.5 Cenário 5: Acesso Centro

Este cenário 5 considera a permissão de entrada de veículos transportadores de produtos perigosos pelo acesso Centro (Rua Benjamin Constant). A combinação de vias para circulação dos produtos perigosos de forma a conectar a rodovia à todos locais de consumidores de produtos perigosos minimizando o risco total é apresentada na Figura 19.

Figura 19 – Cenário com permissão de entrada pelo acesso Centro.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

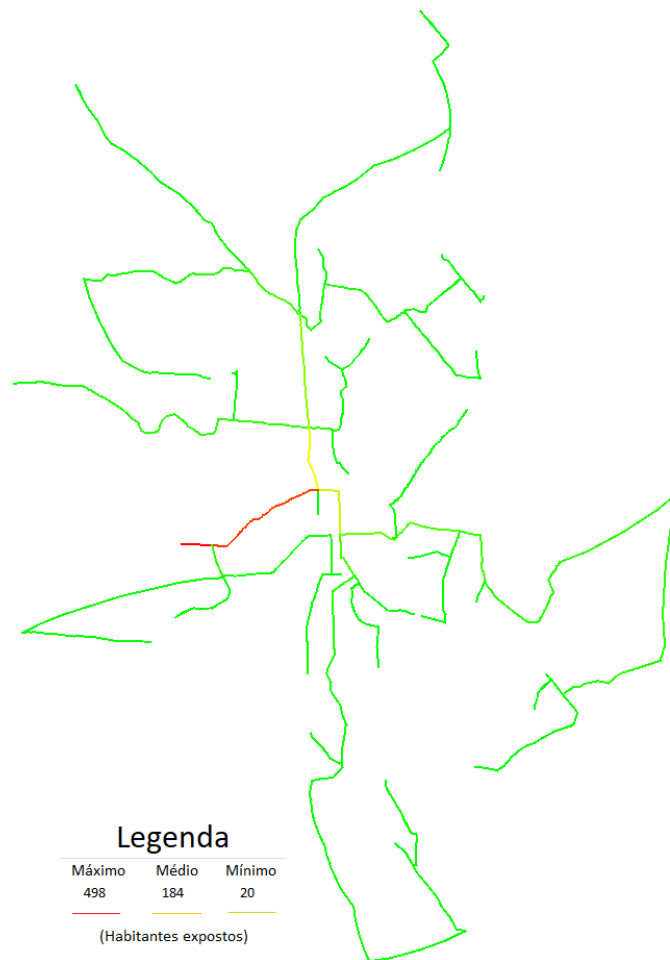
Nesse cenário o risco calculado foi de 26.157,4 pessoas potencialmente expostas, cujas vias próximas ao acesso Rua Benjamin Constant apresentam maior risco total e as demais, em geral, apresentam riscos baixos salientados pelos tons de verde, com algumas poucas vias em tons de amarelo com risco moderado.

4.6 Cenário 6: Acesso Sul

O cenário permite a entrada de veículos transportadores de produtos perigosos pelo acesso Sul (Rua XV de Novembro), cujo risco total nas vias que conectam esse acesso aos pontos de demanda são ilustrados na Figura 20.

Nesse cenário o risco calculado foi de 14.681,0 pessoas potencialmente expostas, cujos riscos maiores são próximos ao acesso considerado, destacando as vias pela cor vermelha na Figura 20 e as demais vias com risco relativamente pequeno destacado pela cor verde.

Figura 20 – Cenário com permissão de entrada pelo acesso Sul.

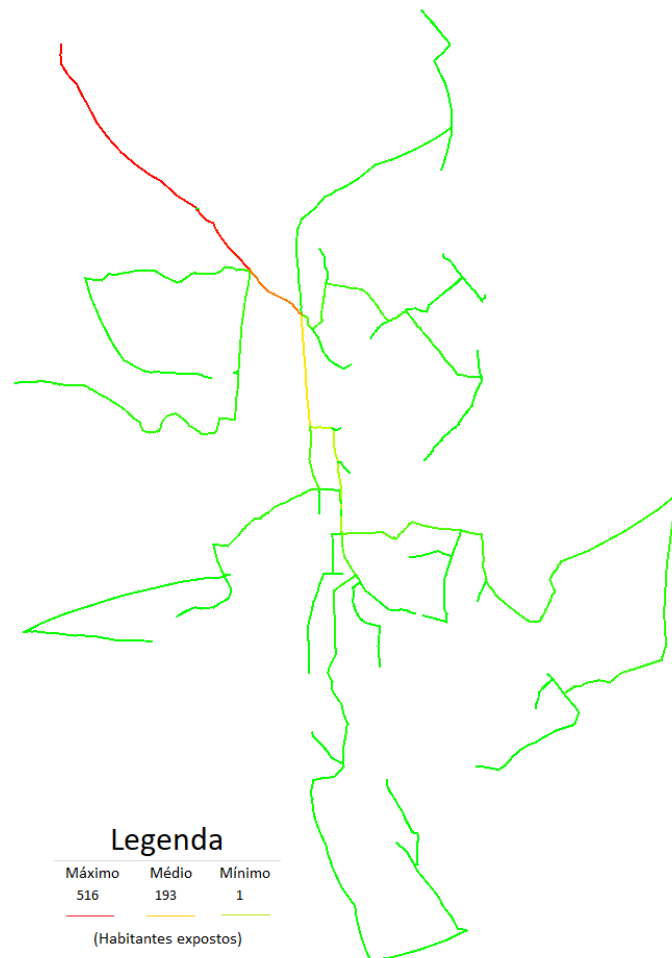


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

4.7 Cenário 7: Acesso Norte

No cenário 7 foi permitida a entrada de veículos transportadores de produtos perigosos pelo acesso Norte (Rua Dona Francisca). A combinação de vias que resulta no menor risco total é apresentada na Figura 21.

Figura 21 – Cenário com permissão de entrada pelo acesso Norte.



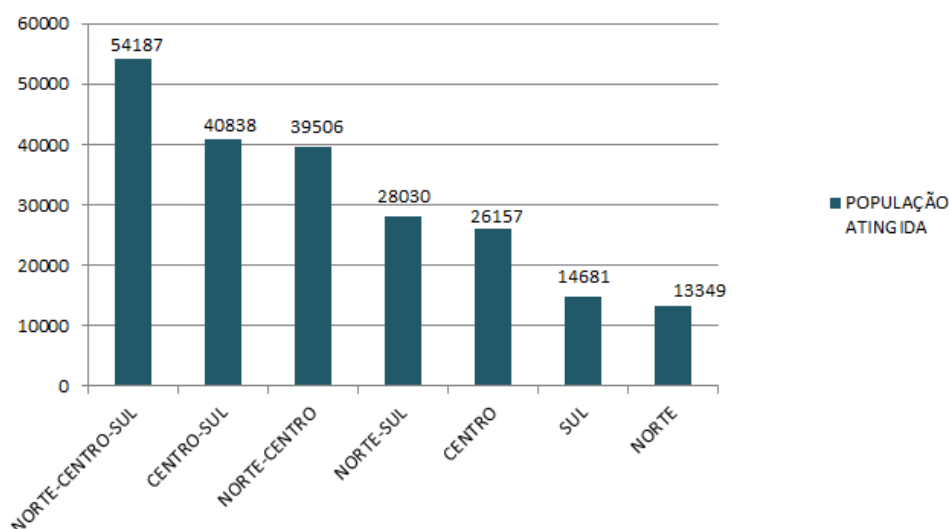
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Nesse cenário o risco calculado foi de 13.349 pessoas potencialmente expostas. As vias que conectam o acesso Norte à região central do município possuem coloração destacada em vermelho por apresentarem maiores riscos, algumas vias que se direcionam à região central têm maior risco, destacadas pelas cores em tons de amarelo, e as vias periféricas apresentam cores em tons de verde por indicarem menor risco.

4.8 Comparação entre cenários

A Figura 22 a seguir representa graficamente a população total potencialmente exposta caso ocorra um acidente em uma das vias do menor caminho identificado entre os acessos ao município e os locais de demanda por produtos perigosos.

Figura 22 – Comparação entre cenários.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A partir do gráfico é possível concluir que o cenário de menor valor total de habitantes potencialmente expostos, em caso de acidentes em uma das vias da rede de tráfego considerada, é aquele que permite a entrada de veículos transportadores de produtos perigosos exclusivamente pelo Acesso Norte.

Percebe-se pela figuras que ilustram cada cenário que a via considerada como acesso apresenta-se destacada em vermelho (maior risco), sendo que as demais entradas não são excluídas da simulação por conectarem vias necessárias ao acesso dos locais distribuidores de GLP e/ou indústrias.

Assim, a Figura 21 representa a sub-rede de transporte mais adequada para circulação de produtos perigosos no município, cujas vias são denominadas por: Adolfo da Veiga, Agulhas Negras, Albano Schmidt, Avenida Jupter, Avenida Kurt Meinert, Avenida Paulo Schroeder, Avenida Procópio Gomes, Avenida Santos Dumont, Benjamin Constant, Boehmerwald, das Cegonhas, Dilson Funaro, Dona Francisca, Doutor João Colin, Fátima, Florianópolis, Getúlio Vargas, Graciosa, Guanabara, Inacio Bastos, Iriú, Jarivatuba, Marques de Olinda, Max Colin, Max Pruner, Minas Gerais, Monsenhor Gersino, Ottokar Doerffel, Papa João XXIII, Piratuba, Prefeito Helmuth Fallgatter, Ruy Barbosa, Santa Catarina, São Paulo, Tenente Antônio João, Tuiuti, Waldemiro José Borges e XV de Novembro.

Este resultado apresenta-se como uma recomendação que visa facilitar o controle do transporte de produtos perigosos no município com o objetivo de minimizar a população potencialmente atingida em caso de acidentes.

4.9 Sugestões de aplicação

A sinalização complementar e restrição horária são instrumentos que viabilizam a aplicação de uma política restritiva para o transporte de produtos perigosos no município. É relevante planejar a implantação de sinalização, seja ela vertical ou horizontal por meio de placas e ilustrações (Figura 23), nas vias permitidas à circulação de veículos que transportam esses produtos, permitindo que os usuários tenham conhecimento sobre as restrições e facilitando a identificação dos veículos para fins de fiscalização (COSTA, 2009).

Figura 23 – Sinalização vertical e horizontal de produtos perigosos.



Fonte: COSTA, 2009.

Além da restrição horária pela sinalização vertical é possível incluir restrições quanto ao tipo de produto e quantidade/tonelagem permitida (Figura 24), nas mesmas convenções utilizadas para veículos com outros tipos de carregamento.

Figura 24 – Sinalização vertical para o transporte de carga.



Fonte: FrotaCia, 2016.

Além disso, a restrição horária pode ser estabelecida evitando-s os horários de maior volume de tráfego, tal que a utilização daqueles equipamentos e estratégias visa facilitar e garantir o controle da circulação de produtos perigosos no município.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em uma sociedade industrializada o transporte de produtos perigosos é imprescindível e, reconhecendo essa importância, a definição de estratégias que visam garantir a circulação segura dos veículos transportadores de produtos perigosos mostra-se como potenciais ganhos diretos e indiretos.

Nesse sentido, os beneficiados não são apenas as empresas envolvidas no manuseio de produtos perigosos e manutenção da segurança no transporte dos materiais, mas também a sociedade em geral é beneficiada pela minimização das perdas e danos materiais, ambientais e humanas em caso de acidente.

Assim, o controle é a melhor forma de prevenir e planejar as ações de resposta em casos de acidentes, tal que a restrição de circulação de veículos que transportam produtos perigosos em áreas mais populosas é uma estratégia para minimizar o número de pessoas atingidas em caso de acidentes.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é propor um conjunto de vias exclusivas para o transporte de produtos perigosos entre os pontos de acesso à rede viária urbana de Joinville-SC pela rodovia BR-101 aos pontos locais de demanda desses produtos no município.

O método considerado neste trabalho, de cálculo do risco de transporte de produtos perigosos equivalente ao número de habitantes potencialmente atingidos sob a hipótese de ocorrência de acidentes nos arcos da rede de tráfego, e identificação das rotas (caminhos) que resulta no menor risco total na rede mostrou-se efetiva para a proposta de um conjunto de vias exclusivas para a circulação de veículos contendo aqueles materiais.

A utilização de um software de Sistemas de Informação Geográficas e aplicação de suas funções a um banco de dados adequadamente formatado para os propósitos deste trabalho possibilitaram a obtenção de resultados efetivos quanto aos objetivos propostos.

A partir das vias de menor risco sugeridas, a sinalização correta e suporte de políticas públicas adequadas, a circulação de produtos perigosos na área urbana de Joinville pode se tornar mais segura, inclusive facilitando a fiscalização e reduzindo o tempo de resposta em caso de acidentes por parte das autoridades competentes.

Como recomendações para trabalhos futuros pertinentes à definição de restrições para circulação de veículos transportadores de produtos perigosos em áreas urbanas é possível apontar os seguintes encaminhamentos:

- Formulação do risco com mais variáveis visando representar melhor a problemática. São exemplos dessas variáveis aspectos geométricos das vias, existência de fragilidades ambientais, entre outros.
- Obter dados sobre fluxo de caminhões que transportam produtos perigosos.
- Considerar a direção de deslocamento das vias (mão única, mão dupla).
- Considerar a variação de fluxo em horários característico de maior volume como fator de agravamento do risco.
- Identificar a magnitude do dano para diferentes tipos de carga e mensurar no cálculo do custo de circulação na rede.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Transporte de produtos perigosos no Mercosul**. 2012. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/13101/Cartilhas.html>>. Acesso em: 05 abr. 2016.
- AMAZONAS. **Lei Nº 2.513, de 16 de dezembro de 1998**. 1998. Disponível em: <<http://www.mpam.mp.br/attachments/article/4833/Lei202.513-98.pdf>>. Acesso em 28 ago. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDÚSTRIA QUÍMICA. **Manual para atendimento a emergências com produtos perigosos**. 2006. 5ª ed. São Paulo. 288p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7500, Nº 20**: identificação para o transporte terrestre, manuseio, movimentação e armazenamento de produtos. 2014. Disponível em: <<http://abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=255687>>. Acesso em: 15 nov. 2016.
- BOAVENTURA NETO, P. O. **Teoria e Modelo de Grafos**: São paulo: Edgar blucher. 1979.
- BRASIL. **Decreto Nº 62.127, de 16 de janeiro de 1968**. 1968. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/antigos/D62127.htm>. Acesso em: 15 nov. 2016.
- BRASIL. **Resolução Nº 5, de 20 de novembro de 1985**. 1985. Disponível em: <<https://www.diariodasleis.com.br/busca/exibmlink.php?numlink=1-8-34-2004-02-12-420>>. Acesso em: 15 nov. 2016.
- BRASIL. **Decreto Nº 96.044, de 18 de maio de 1988**. 1988. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/antigos/d96044.htm>. Acesso em: 04 abr. 2016.
- BRASIL. **Manual de Desastres Humanos: desastres humanos de natureza tecnológica**. 2003. V. 2. – I Parte – Brasília: MI. 452 p.
- BRASIL. **Resolução 701, de 25 de agosto de 2004**. 2004. Disponível em: <http://redsang.ial.sp.gov.br/site/docs_leis/bs/bs8.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2016.
- CORMEN, T. H.; LEISERSON, C. E.; RIVEST, R. L. **Introduction to Algorithms**. 1990. McGraw-Hill and MIT Press, Cambridge, Mass, 1990.
- COSTA, E. E. S. **Metodologia para definição da sub-rede de transporte de produtos perigosos em áreas urbanas**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2009.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de produtos perigosos**. 2014. Secretaria dos Transportes. Disponível em: <<http://200.144.30.103/siipp/arquivos/manuais/Manual20de20Produtos20Perigosos.pdf>>. Acesso em: 11 abr. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE. **Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos**. 2012. Disponível em: <<http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/Apresentacoes/dnit-cargas-perigosas.pdf>> . Acesso em: 15 nov. 2016.

DIJKSTRA, E. W. **A Discipline of Programming**. 1976. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1976.

GERSTING, J. L. **Fundamentos Matemáticos para a Ciência da Computação**. 1995. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1995.

HARWOOD, D. W.; VINER, J. G.; RUSSELL, E. R. **Truck accident rate model for hazardous materials routing**. 1990. Transportation Research Record 1264, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 2006. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Normas brasileiras para o transporte terrestre de produtos perigosos**. 2016. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/painelsetorial/palestras/GeraldoFontoura.pdf>>. Acesso em: 07 mar. 2016.

LANGEVIN, A.; SOUMIS, F. **Classification of Travelling Salesman Problem Formulations**. 1990. Operations Research Letters 9 (1990) 127-132. North-Holland.

MERCOSUL. **Resolução MERCOSUL/GMC/RES Nº 10/00**: instruções para a fiscalização do transporte rodoviário de produtos perigosos no mercosul. 2000.

PLACAR. **Transporte de Produtos Perigosos**. 2016. Disponível em: <http://www.placarsinalizacao.com.br/transp_prod_perigosos_material.htm>. Acesso: 07 mar. 2016.

QUEIROZ, M. T. A. **Acidentes no transporte de cargas/produtos perigosos no Colar Metropolitano do Vale do Aço, Minas Gerais**. 2014. Disponível em: <http://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos08/3_3_acidentes20com20cargas20perigosas20-20final.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2016.

RAMOS, F. B. **Metodologia para escolha de alternativas de rotas para o transporte de materiais perigosos**. 1997. Dissertação (Mestrado em Transporte e Logística) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 1997.

RIO DE JANEIRO. **Decreto Nº 29.231, de 24 de abril de 2008**. 2008. Disponível em: <<http://www.sindrio.com.br/upload/sindrio/arquivo/Decreto20Municipal20TrC3A1fego.pdf>>. Acesso em: 05 abr. 2016.

RIO GRANDE DO SUL. **Decisão Normativa Nº 94, de 21 de dezembro de 2015.** 2015. Disponível em: < http://www.ircnode.com/norma/decisao-normativa-94-2015-rs_314387.html >. Acesso em: 12 nov. 2016.

SANTA CATARINA. **Decreto Estadual Nº 2.894, de 20 de maio de 1998.** 1998. Disponível em: <http://www.sdc.sc.gov.br/index.php/banco-de-precos/doc_view/3-decreto-n-2-894.html>. Acesso em: 28 ago. 2017.

SANTA CATARINA. **Produtos Perigosos.** 2013. Disponível em: <<http://www.defesacivil.sc.gov.br/index.php/component/content/category/112-prevencao.html> >. Acesso em: 28 mar. 2016.

SHEFFI, Y. **Urban Transportation Networks:** Equilibrium analysis with mathematical programming methods. 1985. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1985.

SÃO PAULO. **Lei 11.368, de 17 de maio de 1993.** 1993. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/chamadas/lei_113681993_1306429388.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2016.